

철도차량 운행시 차륜방사소음 저감장치에 관한 연구

A Study on Wheel Noise Reduction Device for Railway Vehicle

이병철† 이진영* 호경찬* 이용현* 김진영*
Byoung-Chul Lee Jin-Young Lee Kyoung-Chan Ho Yong-Hyun Lee Gun-Young Kim

ABSTRACT

The noise emitted during train operation is generated with various reasons. It is known that the major noise generation is classified according to the ranges of train speed; that is, engine noise at lower speed range, rolling noise at medium speed range, and air-borne noise at higher speed range. These noises are transmitted in combined form with the noises generated from track components and under-carriage, etc.

The rolling noise as a major noise at medium speed range is caused by the vibration occurred at wheel/rail interface. The vibration occurred at wheel/rail interface is transmitted to wheel and rail, and this vibration is emitted from wheel and rail as a noise.

The object of this study is to investigate the effect of wheel damper of low noise wheel. In this study theoretical and experimental analysis is performed by numerical model calculations and impact test.

1. 서론

열차소음은 일반적으로 열차의 운행 속도에 따라 저속대역에서는 기기소음, 중속대역에서는 전동소음, 고속대역에서는 공력소음이 주원인으로 알려져 있다. 이 때 중속대역에서 주요 소음원인 전동소음은 레일과 차륜의 접촉부에서 발생한 진동이 그 원인이 되고 직선구간에서는 차륜-레일 상호작용에 의한 전동소음(Rolling noise)이 원인이 되며 곡선반경이 작은 급곡선 구간(곡선반경 300m 이하)에서는 스킨소음(Squeal noise)이 주요 원인이 된다. 레일과 차륜의 접촉부에서 발생한 진동은 레일과 차륜으로 전달되며 소음으로 방사된다. 이러한 소음을 저감시키기 위해 발생원, 전달경로 및 수음점을 고려하여 여러 대책이 적용되고 있다. 그러나 이러한 대부분의 소음저감대책들은 일부 한정된 구간을 위한 대책이라는 단점이 있기 때문에, 차량이 운행하는 전 구간에서 소음저감효과를 발휘하기 위해서는 운행하는 차량에 직접 대책을 적용하여야 한다.

본 연구에서는 철도차량 차륜의 소음을 저감시키기 위한 방법으로 차륜에 진동저감용 댐퍼를 설치한 방음차륜을 검토하였으며, 이론적 고찰과 실험을 통해 진동저감용 댐퍼의 설치 전·후 진동과 소음을 측정하여 분석함으로써 방음차륜의 성능을 검증하였다.

2. 방음차륜

2.1 방음차륜의 일반적 효과

일반적으로 방음차륜은 추진동력장치의 소음이 충분히 낮을 때 전체 소음수준을 상당히 저감시킬 수 있다고 알려져 있다. 이 방음차륜은 차량이 곡선구간을 주행할 때 발생하는 1kHz 이상 고주파수의 스킨소음(Squeal noise)을 효과적으로 저감시킬 수 있다. 즉 지하철과 같이 짧은 반경의 곡선 구간이 많은 경우 발생하는 스킨소음(Squeal noise)을 제어하는데 방음차륜이 효과적이다. 스킨소음은 차륜과 차축 사이가 견고하게 연결되어 있기 때문에 곡선 선로상에서 차륜의 주행이 부드럽지 못하게 되고 차륜이

† 책임저자 : (주)에이브이티, 기술연구소, 정회원
E-mail : bclee@avt.co.kr
TEL : (02)3665-9685 FAX : (02)3665-9686
* (주)에이브이티, 기술연구소, 비회원

레일표면에서 횡방향으로 미끄러지면서 계속되는 스틱-슬립(Stick-slip)과 차륜의 플랜지와 레일 두부의 마찰에 의해 차륜의 고유모드가 가진되어 발생한 진동이 차륜에서 방사되는 고체전달음(Structure-borne noise)을 유발한다. 이 고체전달음은 매질인 공기를 타고 공기전달음(Air-borne noise)으로 바뀌어 방사된다. 따라서 차륜에 감쇠를 증가시켜 차륜-레일의 상호작용에 의한 진동에 의해 발생하는 고체전달음을 저감시킴으로써 동시에 공기전달음을 동시에 감소시킬 수 있다.

2.2 방음차륜의 형상

앞서 언급한 차량 운행에 따른 소음을 저감시키기 위한 방법으로 차륜에 진동저감용 댐퍼를 설치하는 방법인 방음차륜을 개발하고 검토하였다. 방음차륜의 구성은 크게 두 부분으로 댐핑재(Damping material)와 링댐퍼(Ring damper)이다. 방음차륜의 링댐퍼는 4개의 볼트로 차륜과 고정하고, 차륜과 댐퍼의 마찰면에 댐핑재를 위치하여 진동에 의한 변형시 댐핑재에 의해 진동이 흡수되어 감쇠되는 구조이다. Fig. 1은 개발된 방음차륜의 모습과 구조를 보여주고 있다.

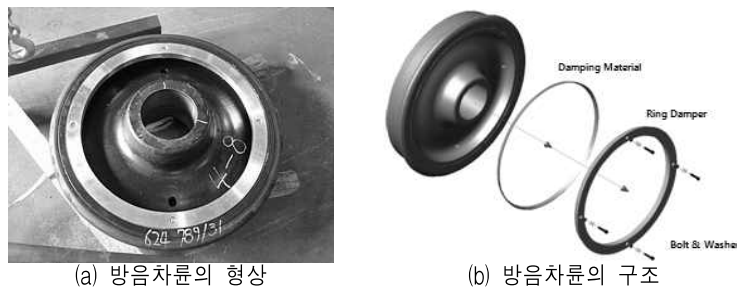


Fig. 1 방음차륜의 형상 및 구조

3. Modal Analysis

3.1 곡선구간의 소음 측정

일반적으로 곡선구간 스켈소음은 곡선반경 500m 이상에서는 많이 발생하지 않으며, 윤축사이의 거리(W)와 곡선반경(R)의 비(R/W)가 100 이하이면 매우 큰 스켈소음이 발생한다. 본 데이터는 2009년 한국소음진동공학회 논문집에 수록된 “지하철 곡선부소음과 차륜 마모와의 관계에 관한 연구”에서 발췌한 곡선반경 300m인 구간에서 측정된 결과이다.

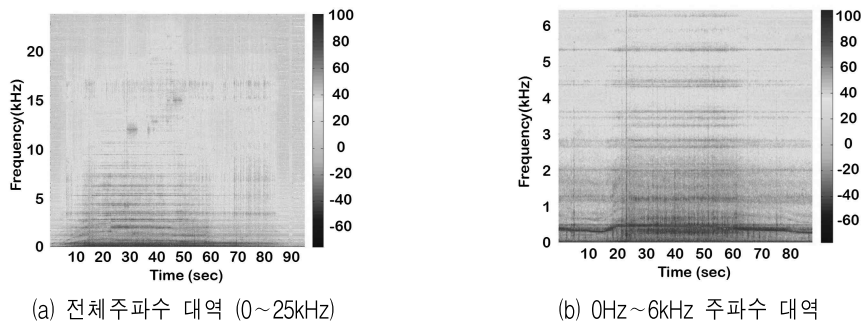


Fig. 2 곡선구간의 소음측정 결과

Fig. 2(a)의 전체주파수 결과를 보면 5kHz 이상의 고주파수 범위에서 높은 소음레벨을 나타내고 있다. 또한 Fig. 2(b)의 6kHz까지 측정결과를 보면 특정한 성분들이 피크치를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 차륜의 고유진동모드와 관련되어 차륜-레일의 진행방향 스틱-슬립 및 횡방향 스틱-슬립에 관련된 것으로 판단된다. 또한 480Hz 부근과 1,200Hz 부근 등에서 피크가 나타남을 알 수 있다. 이렇듯 곡선반경 300m 곡선구간에서 소음은 스틱-슬립 및 플랜지 접촉에 의한 스켈소음이 동시에 포함되어 있음을 알 수 있다.

3.2 유한요소법을 이용한 Modal Analysis

본 논문에서는 철도차량의 소음진동 저감효과를 간접적으로 판단하기 위한 방법으로 유한요소법을 이용한 Modal analysis를 수행하였다. 해석 결과, Fig. 3과 같은 모드들이 나타났다. 이 모드들은 차륜의 타이어 부분이 굽힘진동을 하는 고유모드이며 곡선구간에서 반경방향으로 스틱-슬립이 발생하여 가진될 수 있는 모드들이다. 또, Fig. 3(d)~(f)에서 볼 수 있듯이 모드해석 결과 중 차륜의 반경방향 진동 모드들이 나타났으며 고주파수의 경우 모드의 형상이 복잡하게 나타나고 있다. Fig. 3(g) ~(i)에서 고주파의 경우 차륜 웹 부분의 굽힘모드와 차륜담면의 굽힘, 방사 모드가 동시에 나타났다.

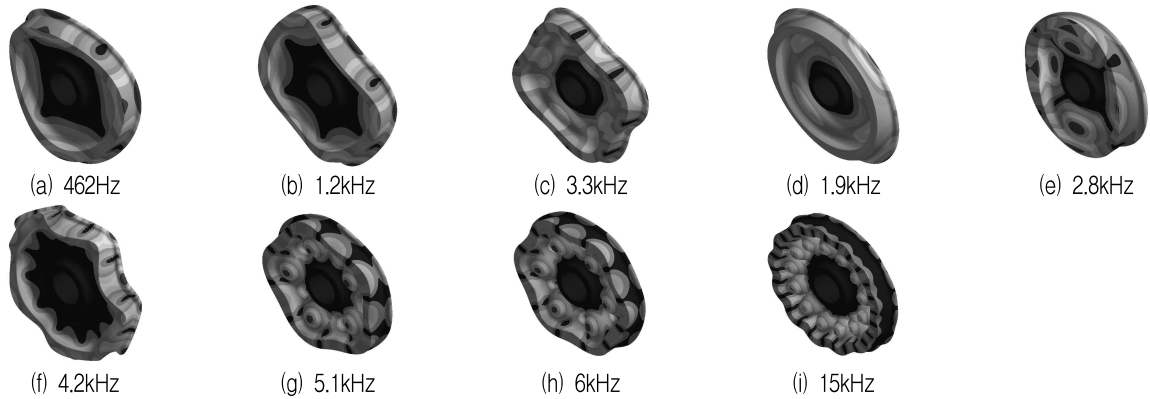


Fig. 3 유한요소법을 이용한 해석결과

모드해석결과와 3.1절의 곡선부 소음측정결과를 비교하면 각 모드의 주파수가 측정결과와 대부분 일치하는 것을 알 수 있다. 차륜의 담면과 레일 두부의 진행방향 및 곡선부 반경방향 스틱-슬립에 의한 소음은 차륜의 모드 및 모드형상과 직접적인 관련이 있음을 알 수 있다.

3.3 충격가진을 이용한 진동응답 실험

본 연구에서 방음차륜에 대해 진동응답실험을 수행하여 3.2절의 Modal analysis 결과와 비교하였다. 실험방법은 임팩트 해머를 이용한 충격가진 방법을 이용하였으며 차륜을 매달아 자유지지 조건 상태에서 임팩트해머로 가진하였다. 가진지점은 차륜의 담면 부분과 웹 부분을 각 1지점씩 가진하고, 8지점에서 진동응답을 측정하였다. Fig. 4는 실험 결과 중 한 지점에 대한 진동응답함수를 보여주고 있다.

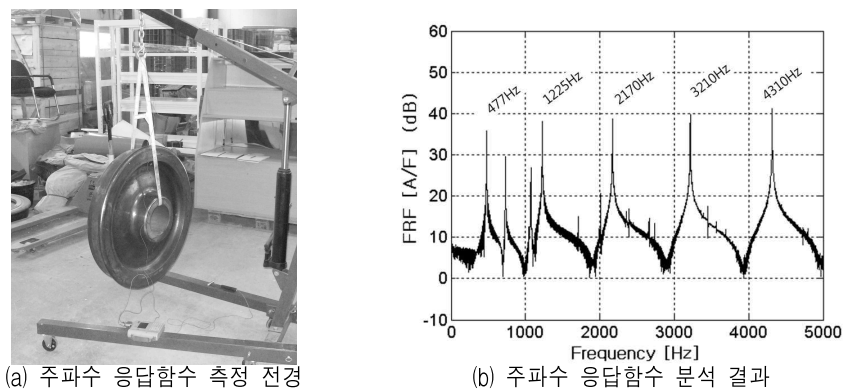


Fig. 4 차륜의 주파수 응답함수 측정 전경 및 결과

진동응답실험 결과, 앞서 수행한 이론해석 결과에서 나타났던 모드 발생 주파수 대역과 유사한 경향이 나타났다. 따라서 실질적으로 차륜의 진동은 차륜의 음향학적 특성(음향방사특성)과 직접적으로 관

련을 가지고 있으며, 차륜의 답면과 레일 두부의 진행방향 및 곡선부 반경방향 스틱-슬립에 의한 소음은 차륜의 모드 및 모드형상과 직접적인 관련이 있음을 알 수 있다. 본 해석 및 분석 결과를 통해 방음차륜의 소음저감 목표주파수를 명확히 할 수 있으며, 모드 형상에 의한 방음차륜의 형상설계에 반영하여 최적의 소음저감장치를 위한 데이터로 활용하였다.

4. 성능시험

4.1 성능 시험 개요

진동흡수용 댐퍼의 성능을 검증하기 위해 실험실 시험을 실시하였으며, 진동저감용 댐퍼 부착 전과 부착 후로 나누어 측정하였다.

성능시험방법은 국내의 규격에 규정되어 있지 않기 때문에 기존에 유사한 시험을 수행한 문헌을 참고하여 준용하였다.

실험은 자유 지지된 차륜을 1m 높이의 0.5kg 강구를 자유 낙하시켜 차륜을 가진하고 차륜의 웹으로부터 10cm 거리에서 음압을 측정하였다. Fig. 5는 시험의 개략도와 시험전경 사진이다.

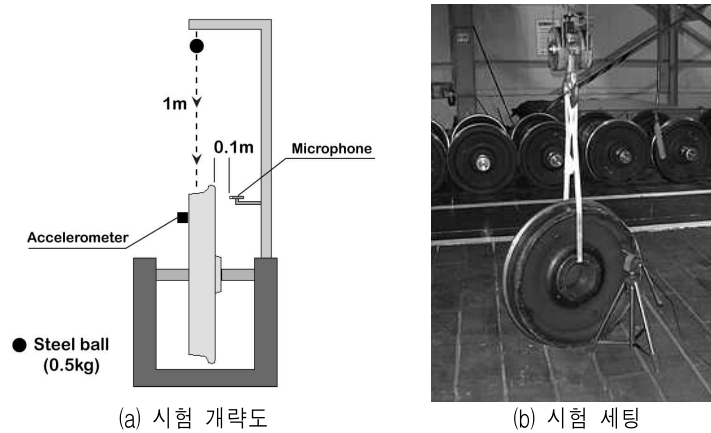


Fig. 5 시험개략도 및 시험전경

4.2 일반차륜 방사소음 측정

댐퍼를 부착하지 않은 일반차륜의 검토결과 시간영역에서 충격가진 후 음압이 완전히 사라질 때까지 걸리는 시간은 약 10초로 차륜은 재질의 특성상 감쇠가 거의 없는 것으로 나타났다. 주파수 분석 결과 0~20,000Hz까지 소음의 레벨은 다르지만 거의 전 주파수대역에 피크가 존재함을 알 수 있다. 또한 약 3,000~5,000Hz 사이에서 가장 큰 레벨의 소음이 관찰되었다. 1/3 Octave band spectrum(A weighting) 그래프에서 보는 것과 같이 2,000~8,000Hz에서 소음이 가장 큰 것으로 분석되어 소음저감을 위한 집중검토 대역임을 확인할 수 있다.

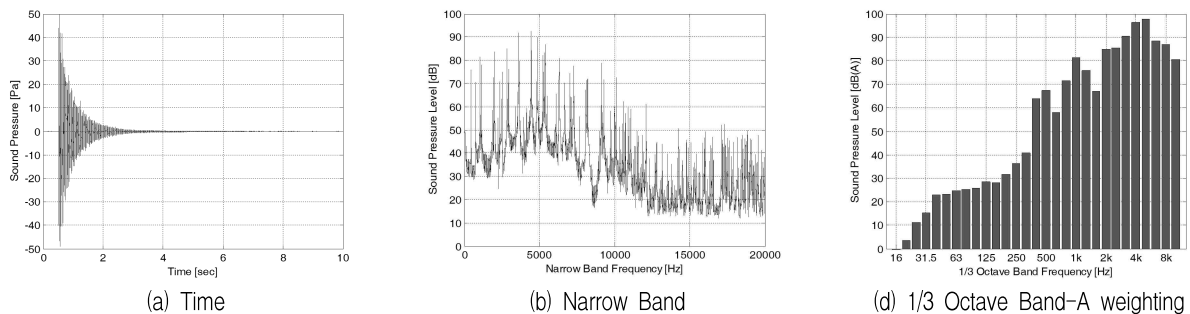


Fig. 6 방음차륜 부착 전 측정 결과

4.3 방음차륜 방사소음 측정

댐퍼를 부착한 방음차륜의 검토결과 시간영역에서 음압이 완전히 사라질 때까지 걸리는 시간은 약 1초로 댐퍼를 설치함으로써 차륜의 감쇠가 크게 향상되었음을 알 수 있다. 주파수 분석결과 댐퍼 설치 전 3,000~5,000Hz 대역에서 90dB 이상의 소음레벨을 갖는 것으로 나타났으나, 설치 후, 동일한 주파수 대역에서 약 70~80dB 이하로 감소되었음을 알 수 있었고 각 피크도 일부 소멸되거나 감쇠의 영향으로 그 형상이 무너졌음을 알 수 있다. 그러나 저주파수에서 댐퍼를 설치한 후에 소음레벨이 약간 증가하는 현상을 확인할 수 있는데 이는 댐퍼의 특성에 의한 것으로 예상되며, 그 크기는 주파수별 최고 소음보다 상대적으로 작기 때문에 성능에는 문제가 없는 것으로 확인하였다.

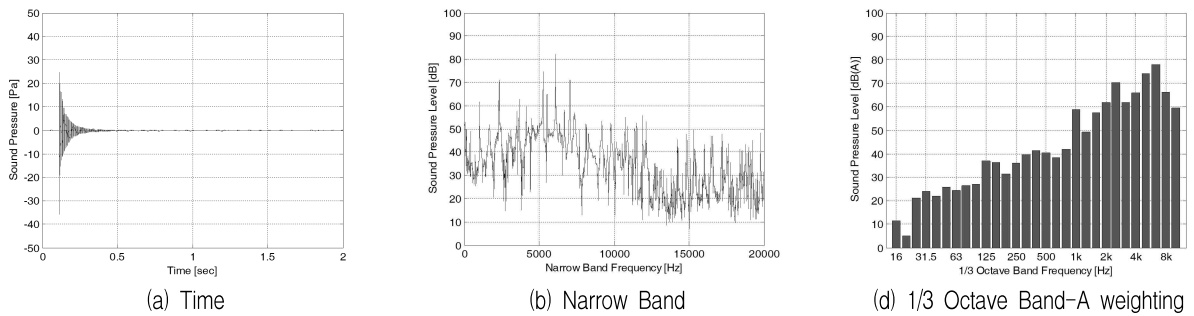


Fig. 6 방음차륜 부착 전 측정 결과

4.4 결과비교

앞에서 분석한 것과 같이 댐퍼를 설치하지 않은 일반차륜과 방음차륜의 시간대역 그래프를 비교하면 Fig. 7에서와 같이 음의 소멸시간에서 확인한 차이가 확연히 발생함을 알 수 있다. Fig. 7에서는 4.5초까지 나타내었으나 이것은 방음차륜의 음압 그래프를 표시하기 위한 것이며, 댐퍼 설치 전 차륜의 소음은 완전히 소멸되지 않은 상태이다. 또한 Narrow band spectrum 비교결과, 피크레벨, 피크개수 및 형상에서 확인한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 피크레벨이 작다는 것은 차량 운행 중 차륜-레일 간의 상호 작용에 의한 소음방사량이 작아짐을 의미한다. 1/3 Octave band spectrum 분석결과, 방음차륜의 성능을 확실히 알 수 있는데 31.5Hz 이하를 제외한 주파수 대역에서 소음저감성능을 확인할 수 있으며, 최대 약 30dB의 소음저감성능을 확인할 수 있다.

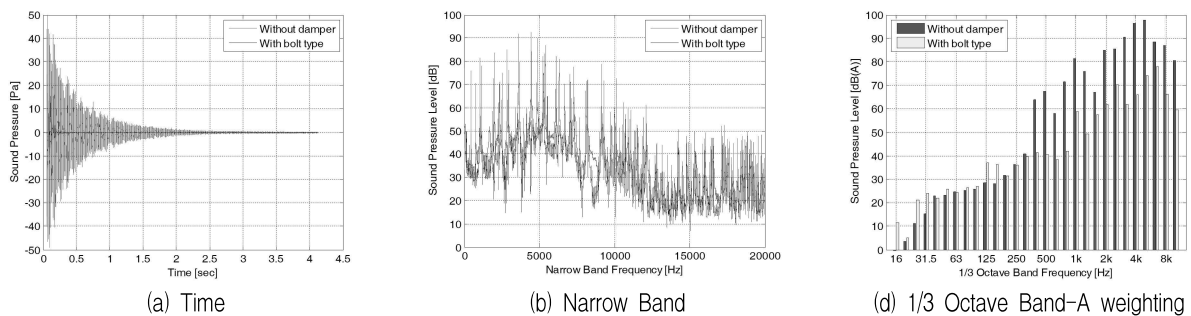


Fig. 7 방음차륜 부착 전 측정 결과

5. 결론

본 연구에서는 철도차량 차륜의 소음을 저감시키기 위한 방법으로 차륜에 진동저감용 댐퍼를 설치한 방음차륜을 검토하였다. 유한요소법을 이용한 Modal analysis와 진동응답실험 결과를 비교·검토한 결과 차륜의 진동은 차륜의 음향학적 특성(음향방사특성)과 직접적으로 관련을 가지고 있으며, 차륜의 답

면과 레일 두부의 진행방향 및 곡선부 반경방향 스틱-슬립에 의한 소음은 차륜의 모드 및 모드형상과 직접적인 관련이 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 방음차륜의 소음저감 목표주파수와 형상설계에 반영하여 최적의 소음저감장치를 위한 데이터로 활용하였다.

또한, 진동저감용 댐퍼의 설치 전·후 진동과 소음을 측정, 분석함으로써 방음차륜의 성능을 검증하였다. 분석 결과, 음의 소멸 시간이 댐퍼 설치 전에는 약 10초에서, 댐퍼 설치 후에는 약 1초로 시간이 1/10로 감소되었으며, 방사소음은 저주파 영역(31.5Hz 이하)을 제외한 모든 주파수대역에서 소음저감 성능을 확인하였다.

그러나 본 연구는 단일 차륜에 대해 실험실에서 실험한 결과이기 때문에 운행 차량의 결과와 차이가 있을 것으로 예상된다. 따라서, 운행차량에 방음차륜을 적용하여 실험을 수행하고 차륜답면의 마모나 차량의 운행 특성 등을 고려한 검토와 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 유원희, “지하철 소음저감을 위한 방음차륜 적용시험”, 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.487-494, 1999. 11.
2. 유원희, “지하철 곡선부소음과 차륜 마모와의 관계에 관한 연구”, 한국소음진동공학회논문집 제19권 제 1호, pp.85-93, 2009.
3. 김관주, “곡선부 스킵소음발생 메커니즘이 실험적 연구”, 한국철도학회논문집 제11권 제2호, pp.176-181, 2008.
4. 이태욱, “모드해석과 충격 가진을 이용한 차륜 진동에 대한 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회, pp.734-739, 2003.
5. Ines Lopez Arteaga, “Theoretical and experimental analysis of ring damped railway wheels”, Universidad de Navarra, 1998. 10